

Dark Quest II: 距離依存した成長率を持つ宇宙モデルにおける銀河バイアス

西道 啓博 (京都大学 基礎物理学研究所)

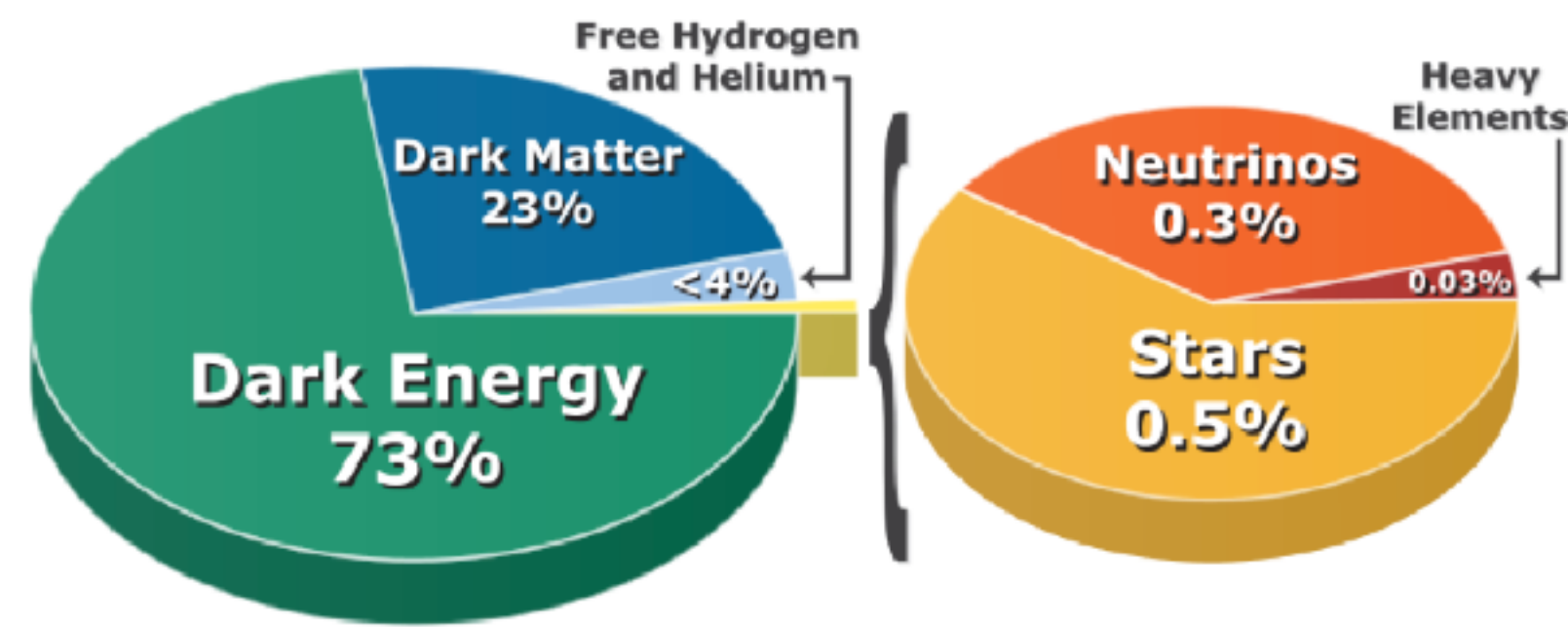
共同研究者

DQ1: 高田昌広, 高橋龍一, 大里健, 白崎正人, 大木平, 宮武広直, 大栗真宗, 村田龍馬, 小林洋祐, 吉田直紀, 杉山素直

DQ2: 田中 賢, 小林洋祐, 吉川耕司

「第10回 観測的宇宙論ワークショップ」 2021年11月18日

Dark Questプロジェクト (2015~)



宇宙論モデル・パラメータ

$$\omega_b, \omega_c, H_0, A_s,$$

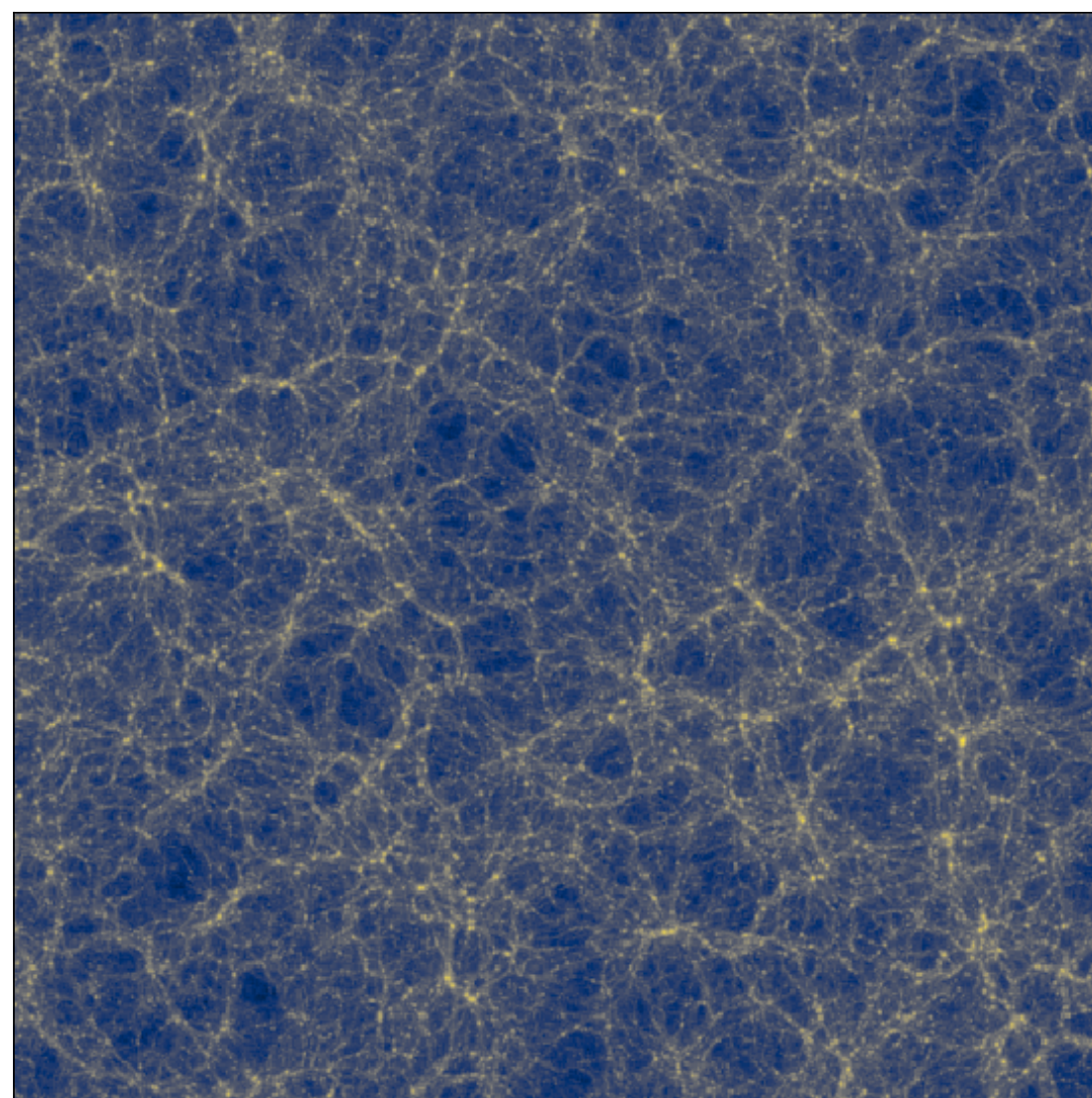
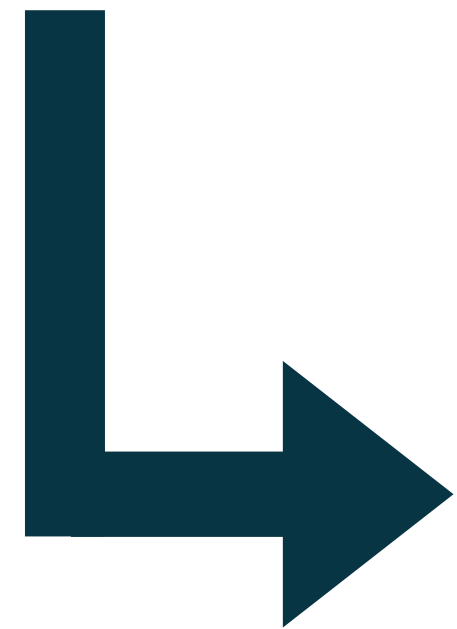
$$n_s, w_0, \dots$$

高速エミュレーション

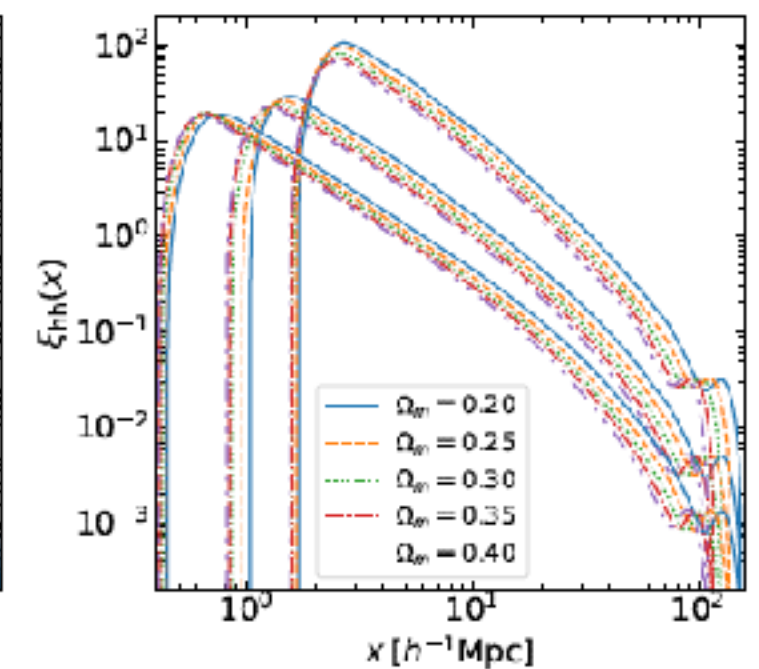
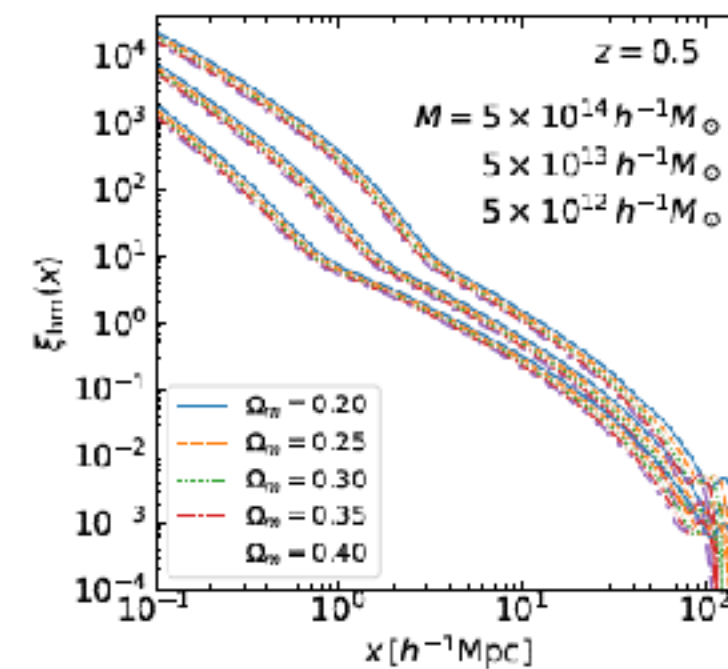
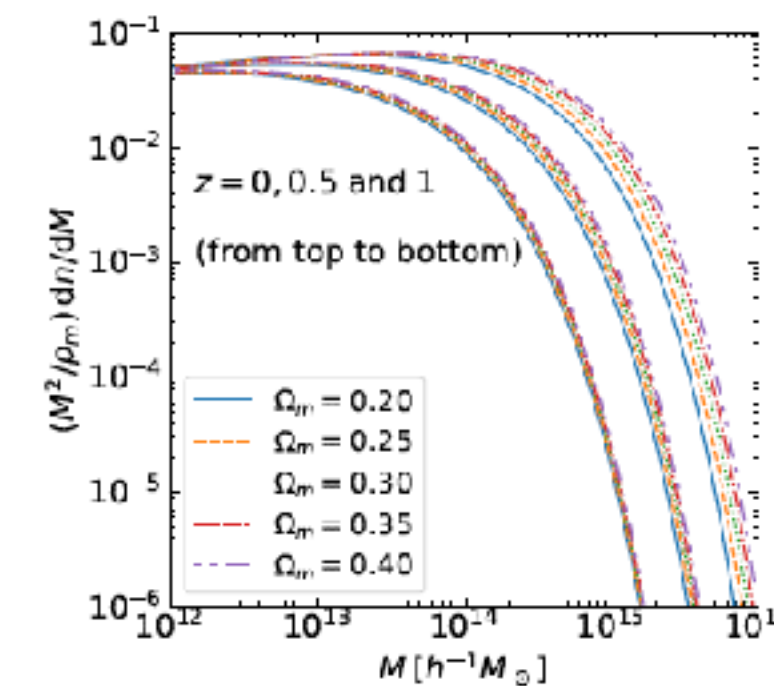
観測データと比較してベイズ推定



銀河(ハロー)クラスタリング基本統計量



統計
解析



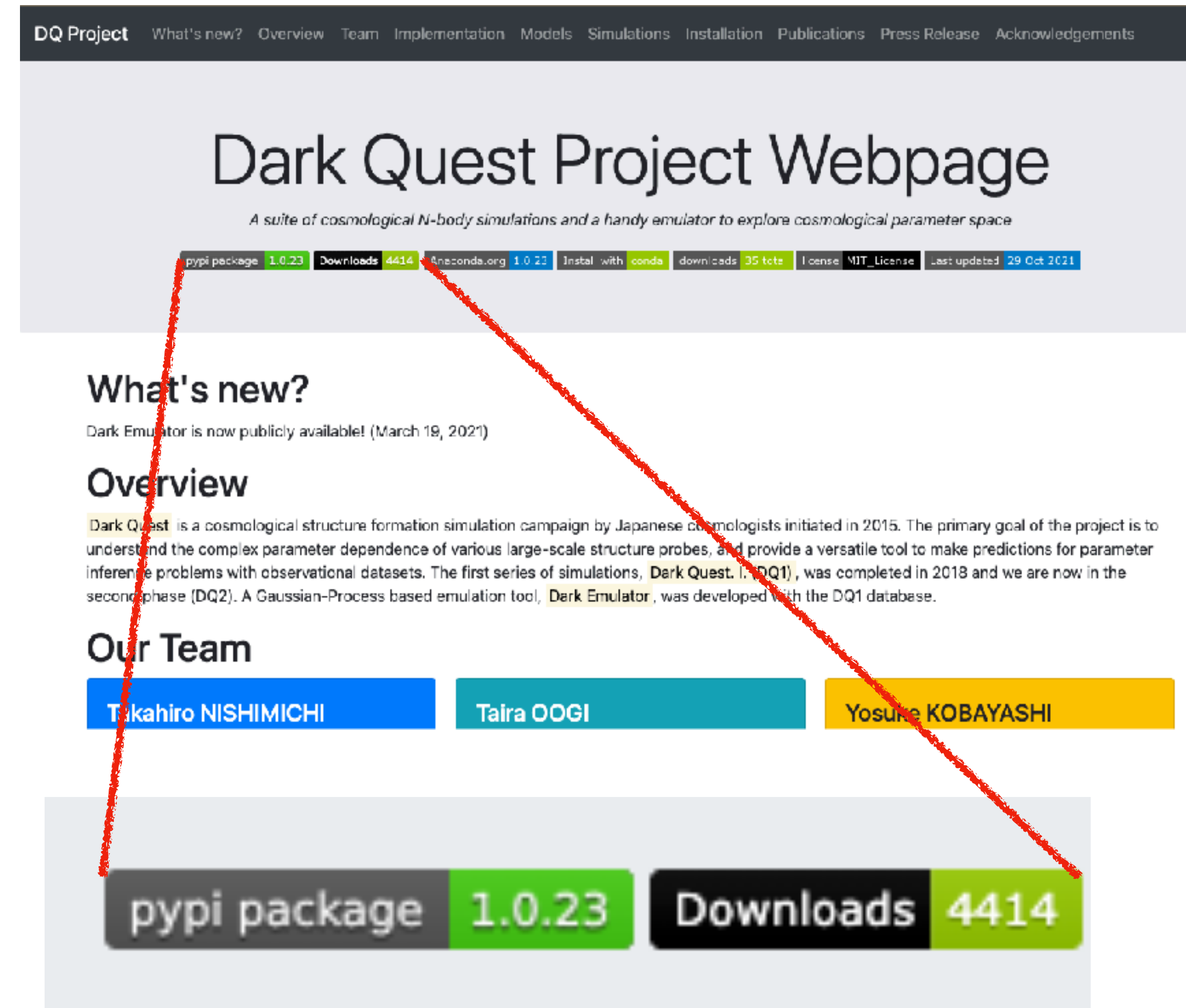
大規模構造(**biased tracer**)の基本統計量を
宇宙論パラメータの関数として調べ尽くす

Dark Quest I.に基づく Dark Emulator公開

- 2021 3/19 public release
- プロジェクトWebページ
<https://darkquestcosmology.github.io/>
- 最新バージョンはgithubで管理
- ドキュメンテーション: readthedocs
- 観測データへの応用
 - SDSS DR12 の Full shape RSD 解析
 - Kobayashi, TN, Takada, Miyatake (arXiv:2110.06969)
 - HSCxSDSS lensing + clustering解析
 - 午後の宮武さんの講演 (arXiv:2111.02419)

```
pip install dark_emulator
```

```
conda install -c nishimichi dark_emulator
```



More than > 4k downloads in ~8 months!

Dark Quest IIへ

本講演

DQ1

DQ2

コード	Gadget2 (Springel `05)	FDPS based code	TN, Tanaka, Yoshikawa in prep.
宇宙論モデル	6D (base 5D + dark energy EoS)	9D (DQ1 + time-varying DE + neutrino mass + spatial curvature)	
想定する天体	重い銀河 ($>10^{12}M_{\text{sun}}$) ~ 銀河団	軽い銀河 (輝線銀河) ~ 宇宙最大級の銀河団	
粒子数	$2,048^3$	$1,024^3 \sim 3,000^3$ (3倍強の規模)	
領域の大きさ	1 & 2 Gpc/h	1, 2 & 4 Gpc/h	
実験計画	多層ラテン超方格	Sequential design	
回帰モデル	ガウス過程	多層ニューラルネット、超解像エミュレーション	
		→次の田中さんの講演	

コード

- Gadget2 -> FDPS (Framework for Developing Particle Simulator; Iwasawa+'16)
- GreeM (Ishiyama+'09) のPM部分をベースとしたTreePMコード
- SIMD 演算による加速 (Phantom-GRAPE Tanikawa+'12, 13)
- N-body Gauge (Fidler + '15)
- “Linear Response” 法: PM 部分 (Green関数) にさまざまな物理効果を線形レベルで実装

Massive neutrino
Massless neutrino
Photon

Metric PT
DE clustering

- 省メモリ化
- Gadgetベースのタイムステップ
- 細かい精度テスト
- ポストプロセスコードのアップデート

線形応答法

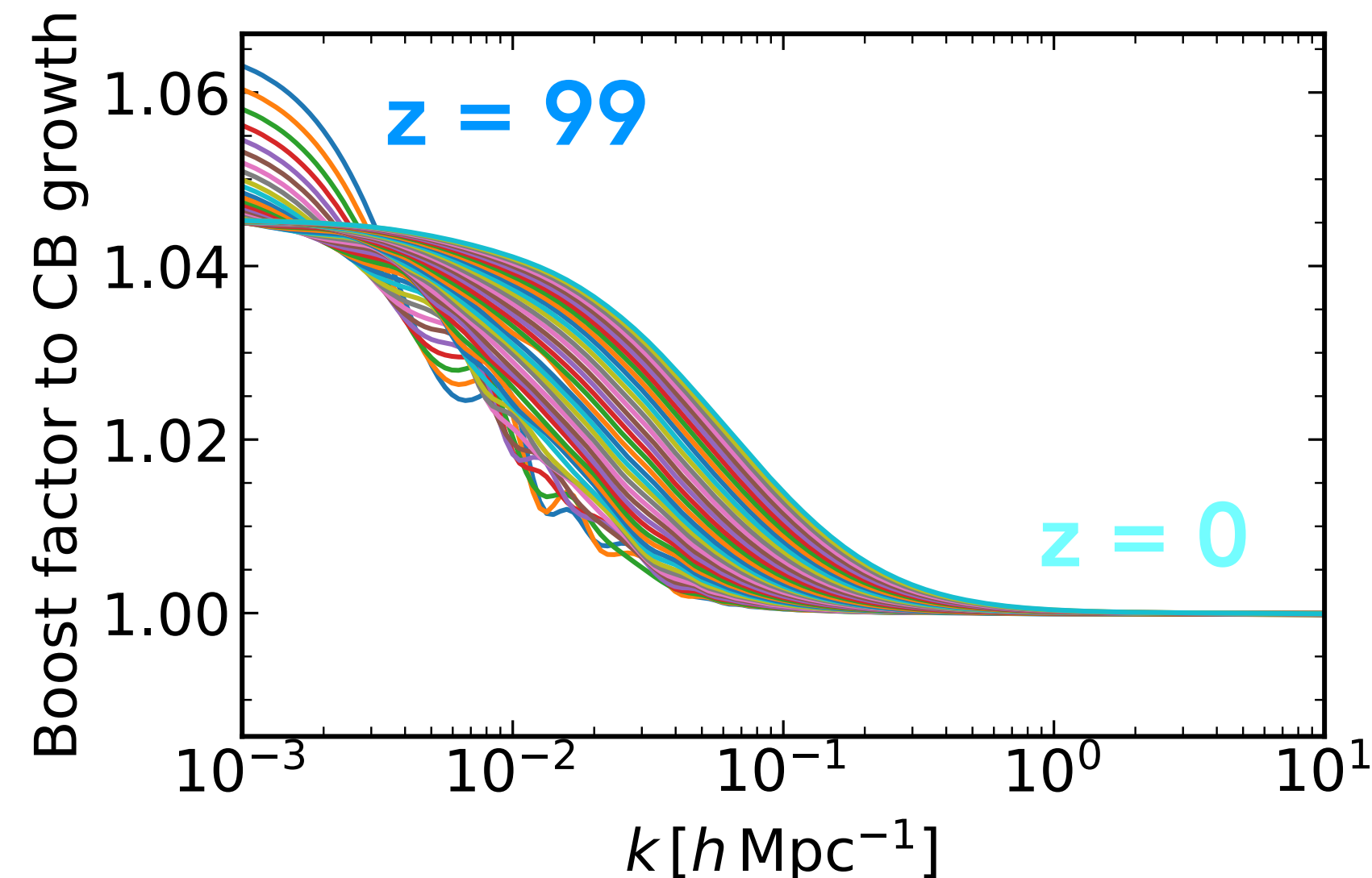
BolzmennコードCLASSで線形解を求めてtabulateする

$$\frac{d^2 T_{cb}(k)}{d(\ln a)^2} + \left[1 + \frac{d \ln \mathcal{H}}{d \ln a} \right] \frac{dT_{cb}(k)}{d \ln a} = \frac{3}{2} \left[\Omega_{cb}(a) T_{cb}(k) + S_{\text{other}}(k) \right]$$

Expansion history

Transfer function for CDM+baryon fluid

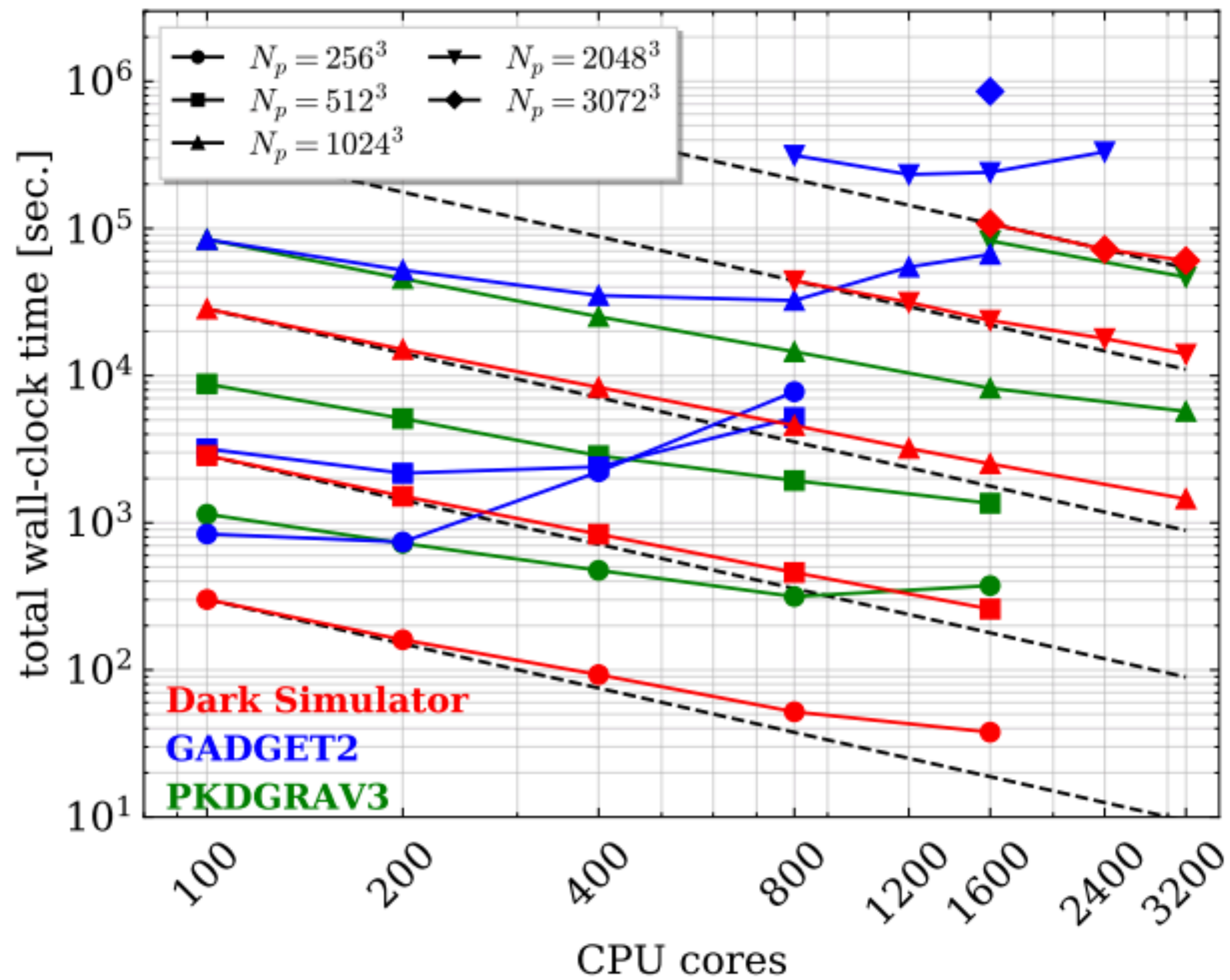
External sources



CDM+baryonだけの時に比べて、どれだけ余分に成長しているかを表す「boost factor」を引き出して、Green関数にかける

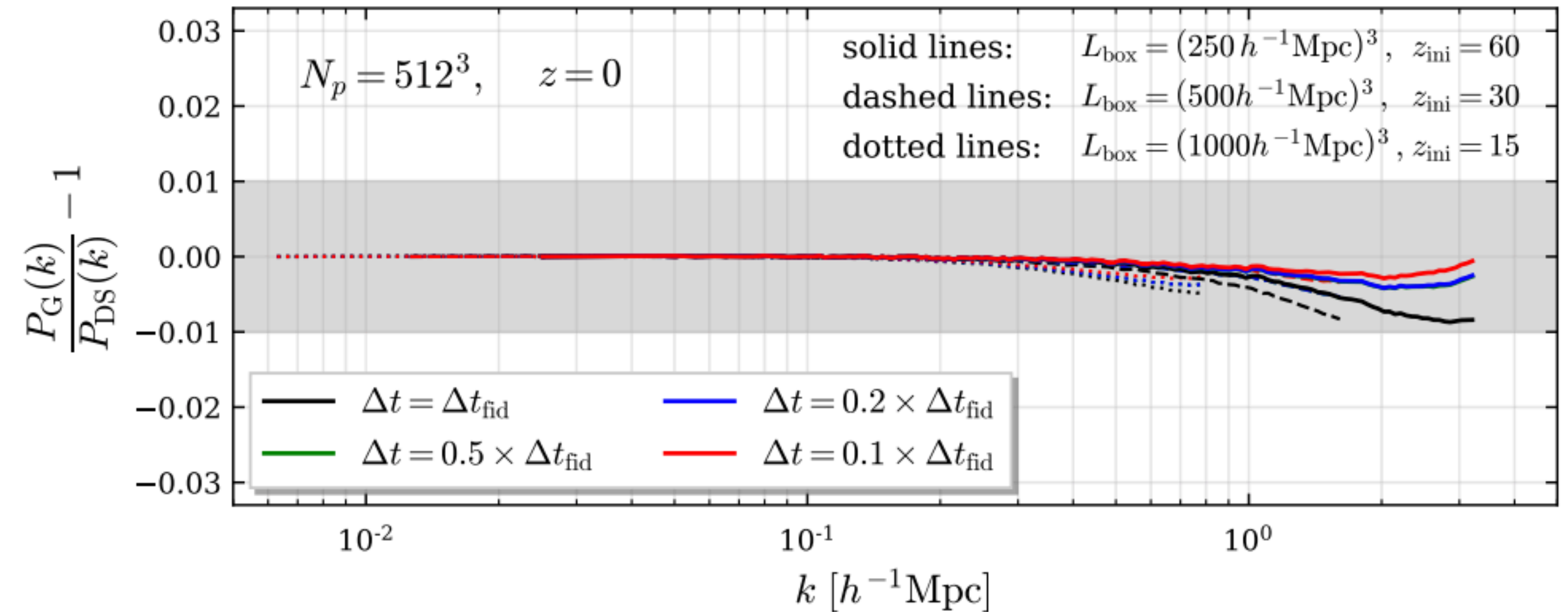
コード

より良いスケーリング

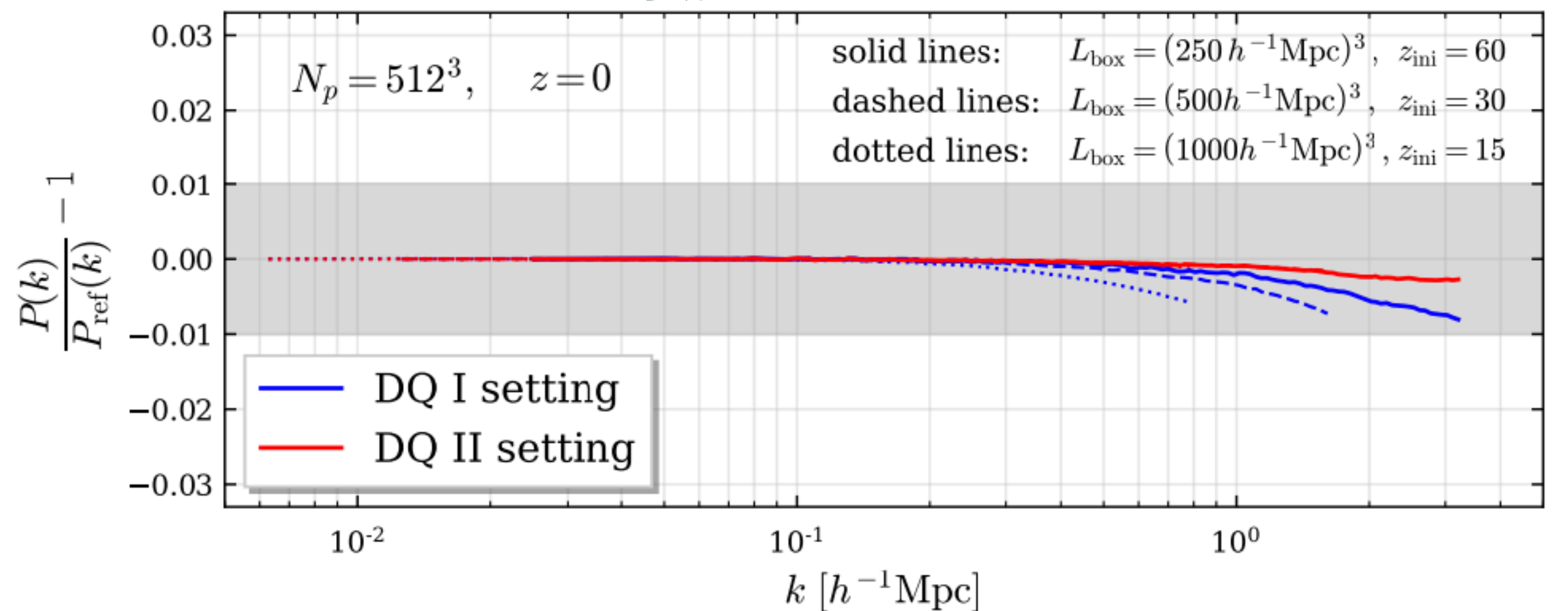


factor > 3 - 10 speedup!

内部パラメータを厳しくする
と2つのコードの結果が収束



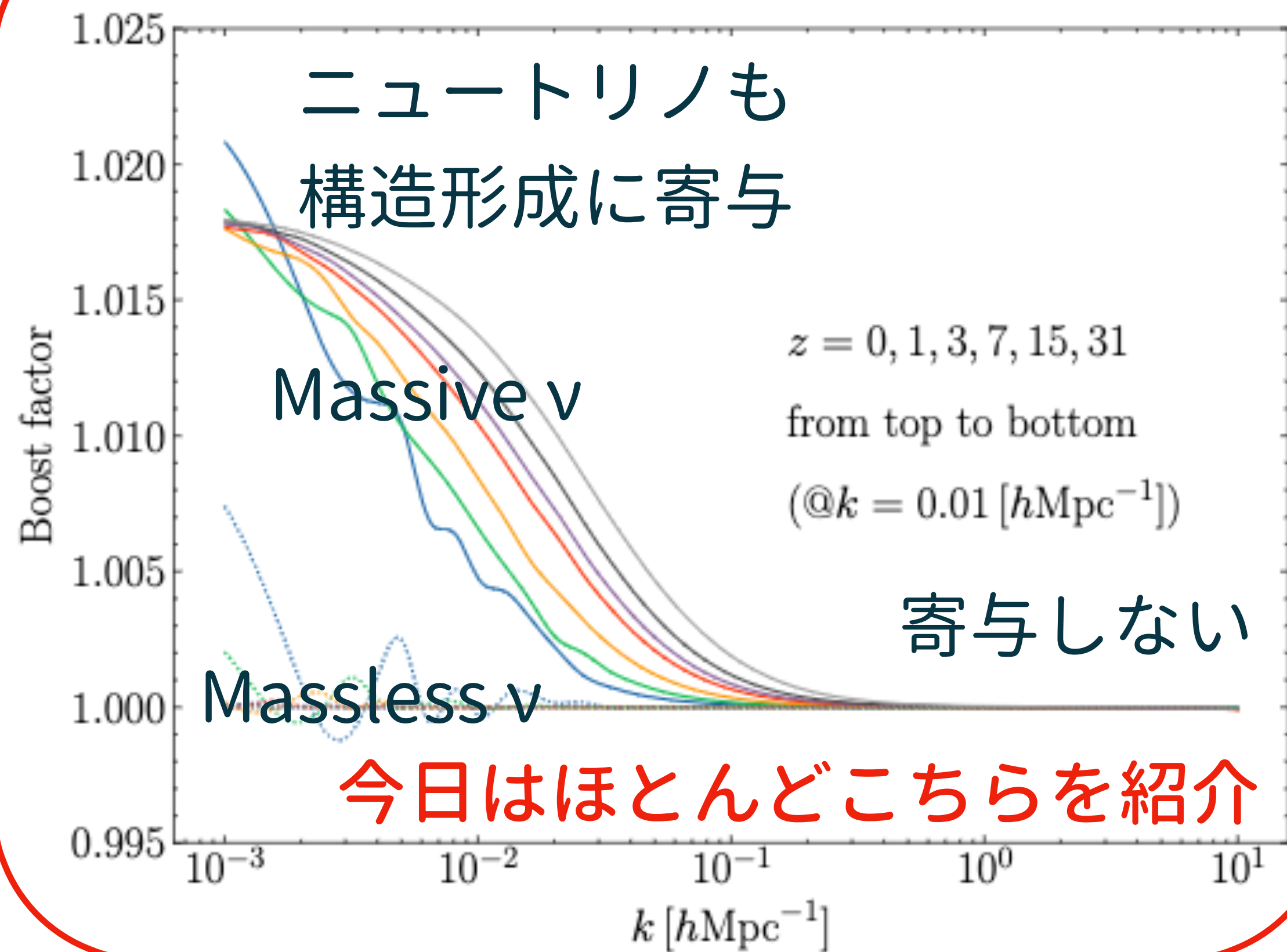
精度をそこまで落とさず、かつ高速に実行可能なパラメータを決定



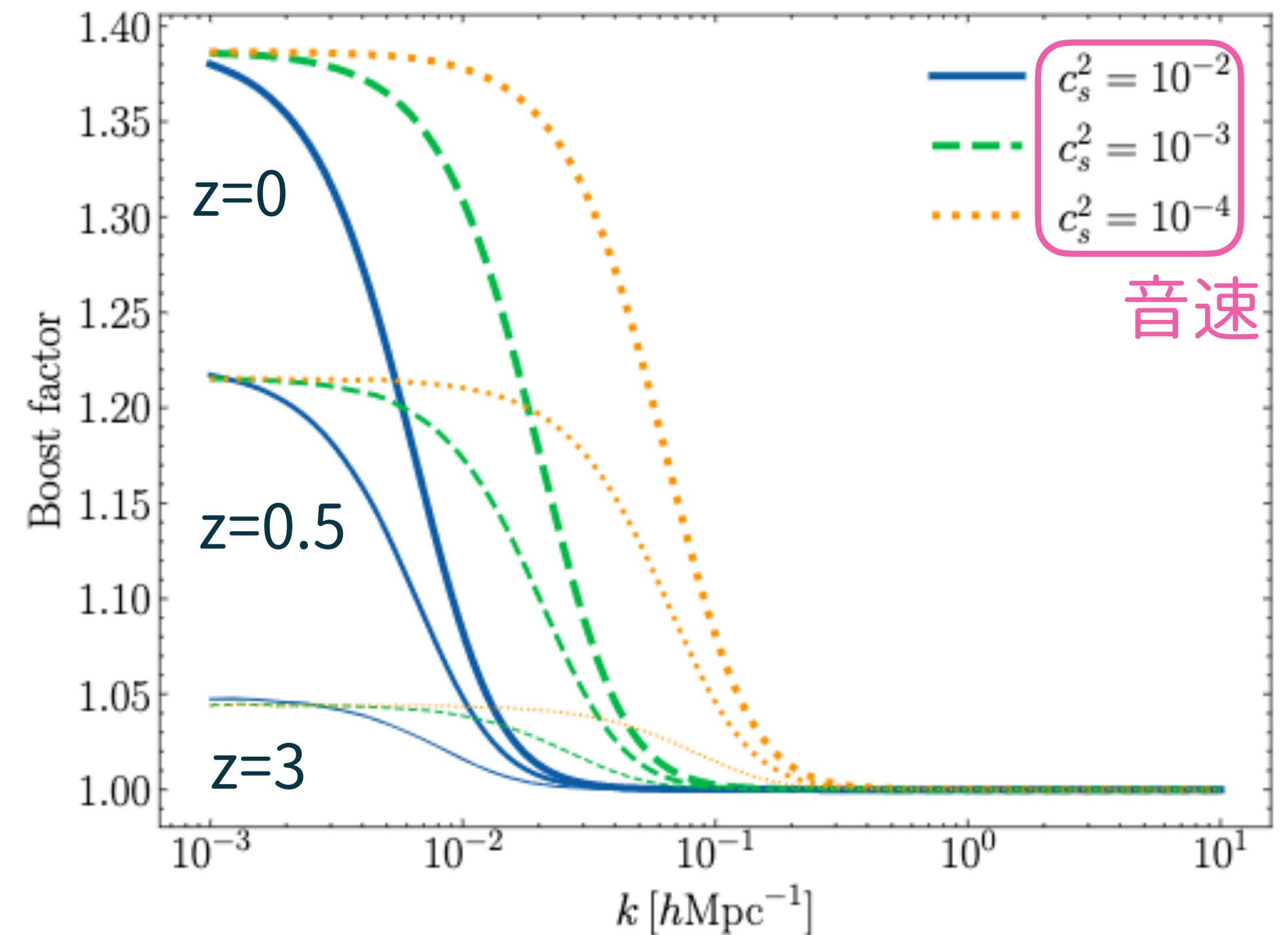
距離に依存した揺らぎの線形成長率

e.g, Takada '06

Massive neutrino ($M_\nu = 0.24\text{eV}$)



Dark Energy Clustering ($w_0 = -0.6, \Omega_{\text{de}}=0.8$)

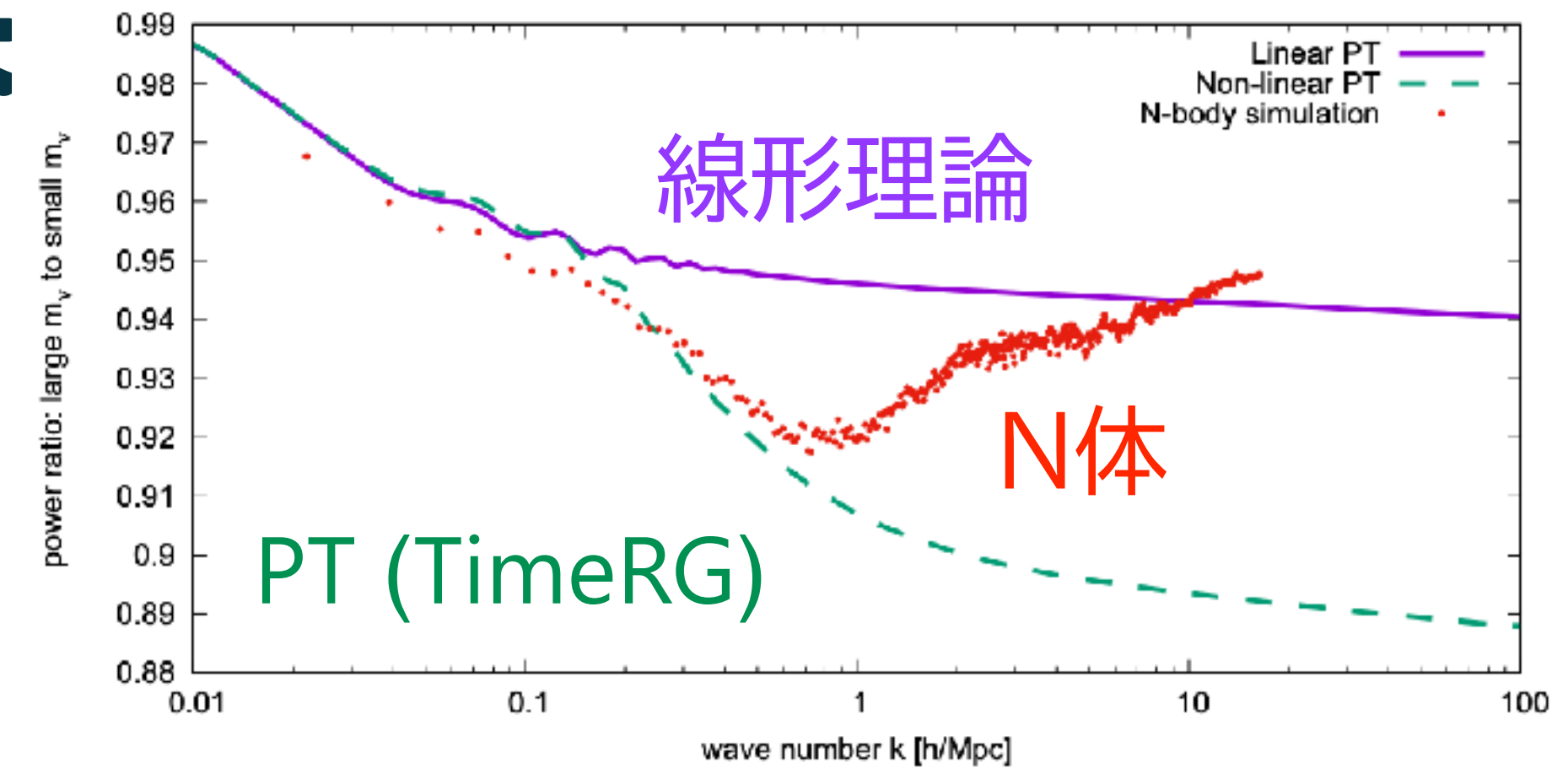


通常物質 (CDM + baryon) しかなかった場合と比べて、どれだけ重力が増幅されるかを決める因子 (線形理論) $\rightarrow$ N体コードに実装

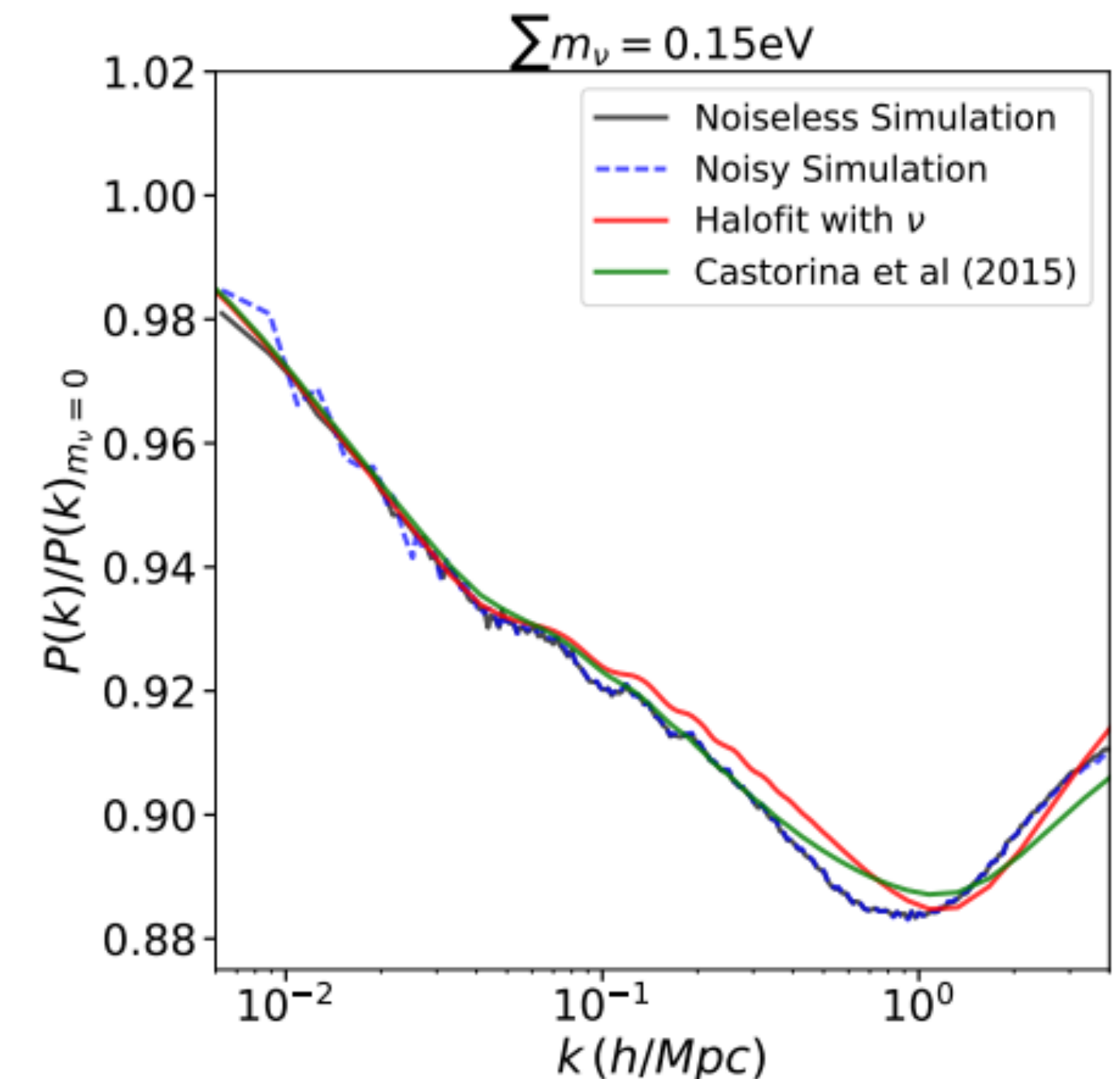
有質量ニュートリノの効果

- neutrinoを重くした分CDMを減らすと、小スケールの揺らぎが抑制
- 様々な手法でシミュレーションしているが、、、
 - particle法、mesh法、hybrid、Vlasovなど
 - 物質のパワースペクトル：一致した予言
 - halo modelにより解釈可能なスプーン型
 - 1/2 halo termの切り替わりがminimumに対応
 - 現在の上限あたりの質量($\sim 0.2\text{eV}$)では10%程度の効果 →
SuMIRe PSFはじめ次世代観測で検出/棄却!?
- Biased tracerではどうなる？

Hannestad, Upadhye & Wong `20



Banerjee, Powell, Abel, Villaescusa-Navarro `18



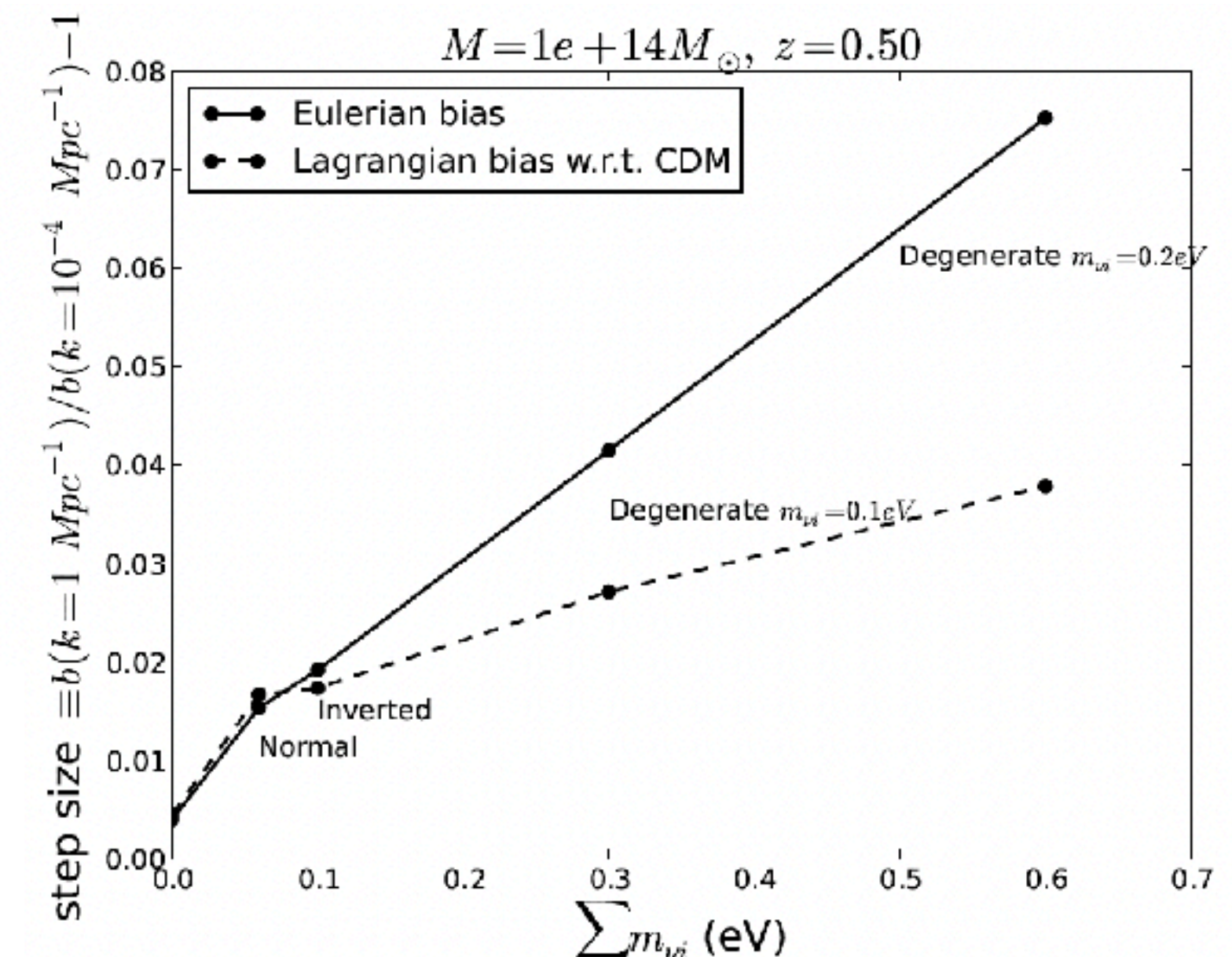
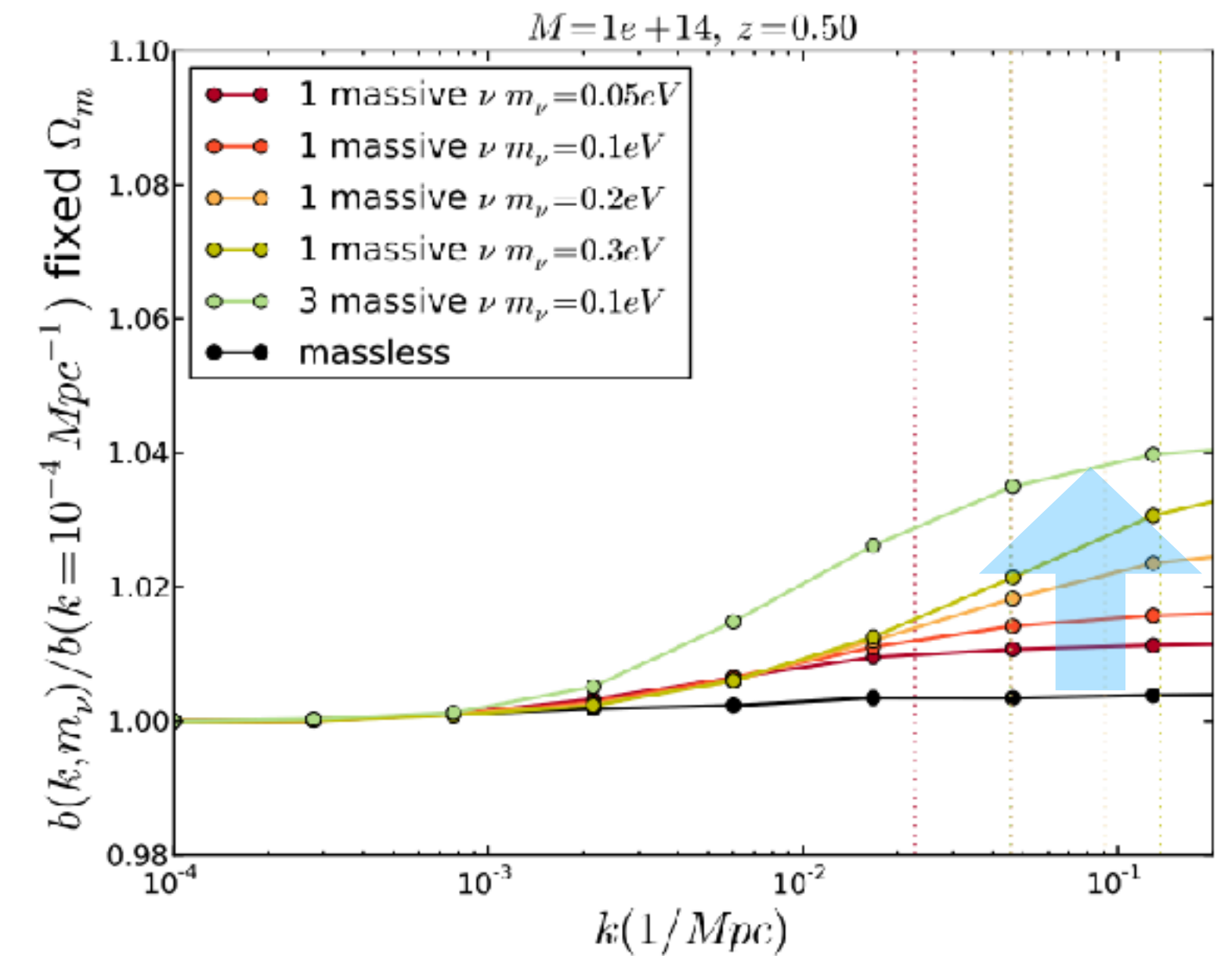
Biased tracers?

- Biasがscale-depndentになり、ニュートリノ質量に対する感度が鈍るという不吉な予言がある
- Parfrey, Hui & Sheth 2011: “scale-dependent halo bias from scale-dependent growth”
 - Excursion set formalism
 - Neutrinoについては考えず
- LoVerde 2014: ニュートリノの場合に適用 (spherical collapse + PB split)

$$b(k) \equiv \frac{P_{nm}(k)}{P_{mm}(k)} = \left(1 + \frac{d \ln n}{d \delta_{crit}} \frac{d \delta_{crit}}{d \delta_{c,L}}(k) \right) \frac{f_c P_{cc}(k) + f_\nu P_{c\nu}(k)}{P_{mm}(k)}.$$

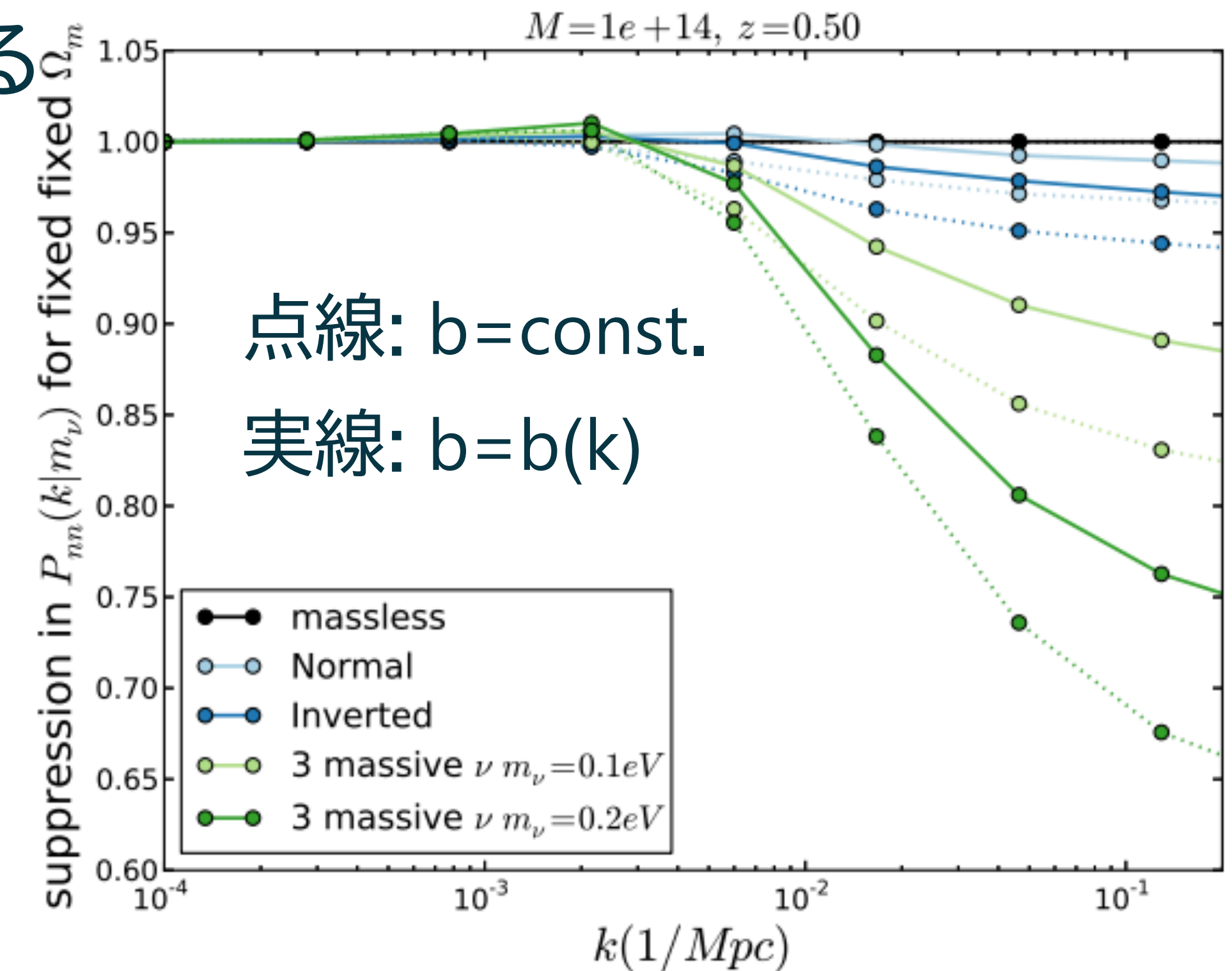
$$b(k) \equiv \frac{P_{nm}(k)}{P_{mm}(k)}$$

LoVerde 2014



Biased tracers?

- Biasがscale-depndentになり、ニュートリノ質量に対する感度が鈍るという不吉な予言がある
- Parfrey, Hui & Sheth 2011: “scale-dependent halo bias from scale-dependent growth”
 - Excursion set formalism
 - Neutrinoについては考えず
- LoVerde 2014: ニュートリノの場合に適用 (spherical collapse + PB split)



LoVerde 2014

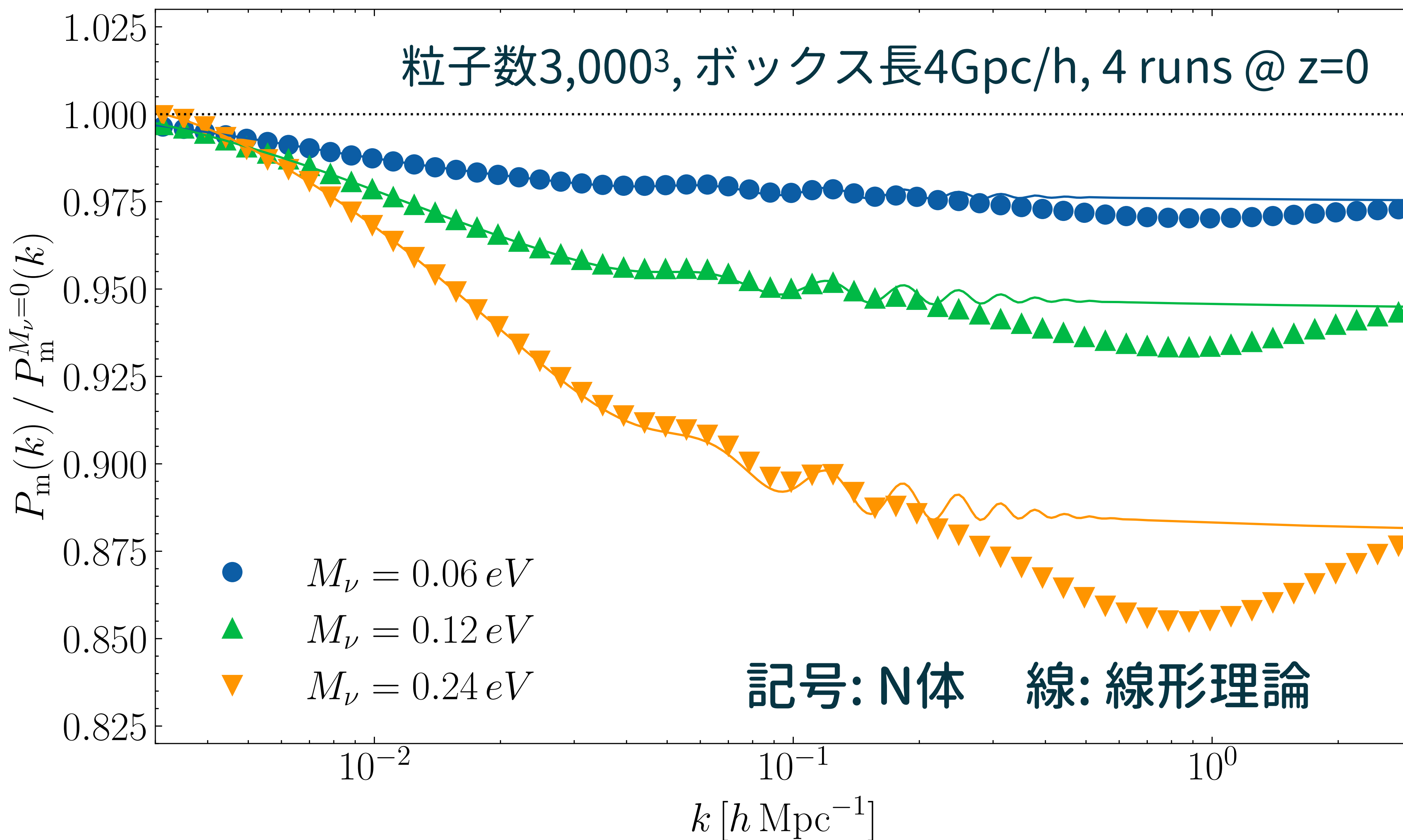
$$b(k) \equiv \frac{P_{nm}(k)}{P_{mm}(k)} = \left(1 + \frac{d \ln n}{d \delta_{crit}} \frac{d \delta_{crit}}{d \delta_{c,L}}(k) \right) \frac{f_c P_{cc}(k) + f_\nu P_{c\nu}(k)}{P_{mm}(k)}.$$

今回用いるシミュレーション

Model	Ω_{de}	M_ν [eV]	w_{de}	c_s^2	$L_{\text{box}} [h^{-1}\text{Gpc}]$	N_{rand}
Nonu	0.6843	0	-1	-	1, 2, 4	2, 2, 4
Nu1 (fiducial)	0.6843	0.06	-1	-	1, 2, 4	2, 2, 4
Nu2	0.6843	0.12	-1	-	1, 2, 4	2, 2, 4
Nu3	0.6843	0.24	-1	-	1, 2, 4	2, 2, 4
DE0	0.8	0	-0.6	1	4	1
DE1	0.8	0	-0.6	0.01	4	1
DE2	0.8	0	-0.6	0.001	4	1
DE3	0.8	0	-0.6	0.0001	4	1

- $M_\nu = 0, 0.06, 0.12, 0.24$ eV の 4 モデル
- $N = 3,000^3$, $L = 4\text{Gpc}/h$ のもの4 realization/モデルを用いる
- 6+1D Rockstar (Behroozi+13) finderを用いて (sub)halo を同定
 - 以下では便宜上, halo + subhaloのことを「銀河」と呼ぶ

Matter power spectrum

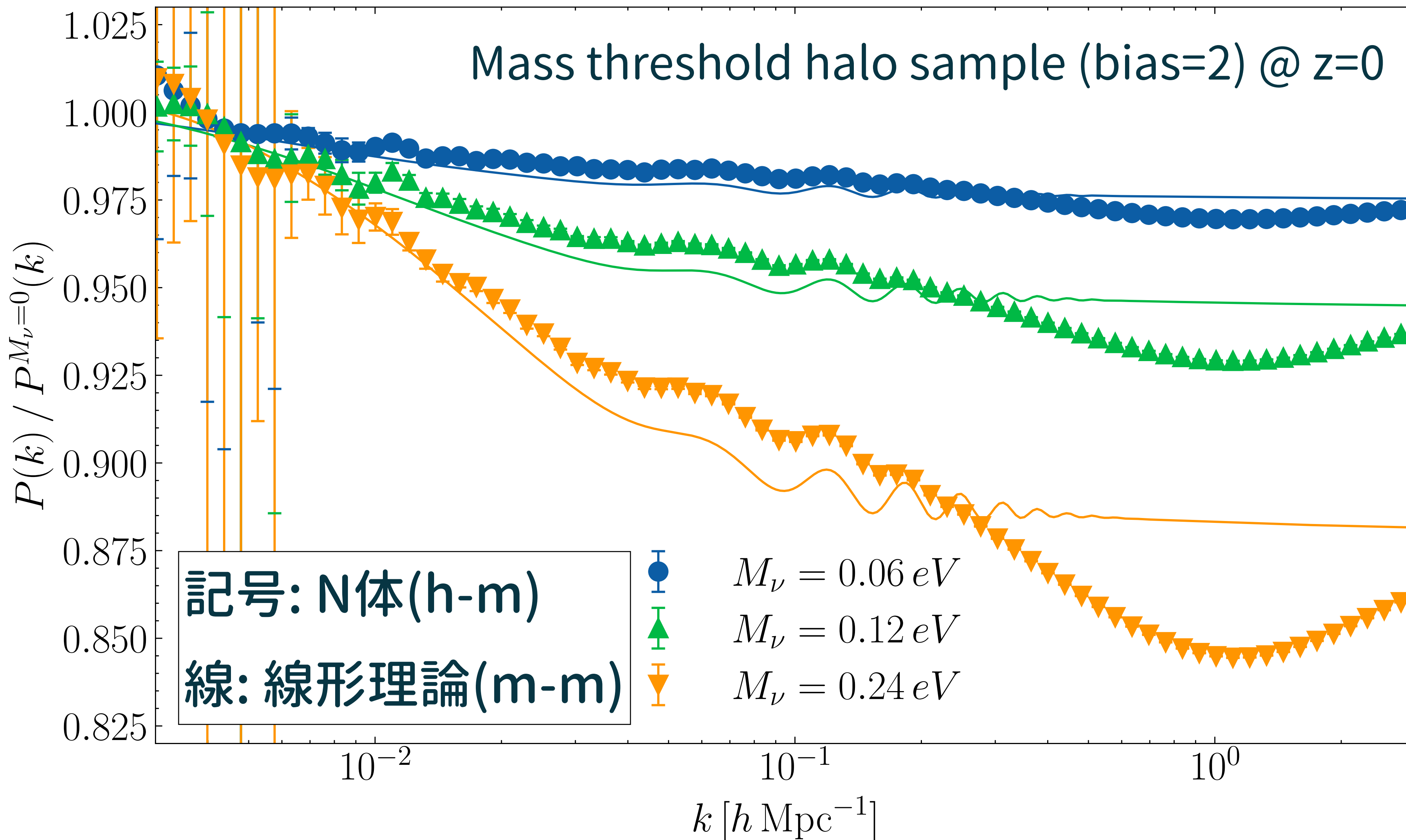


- 波数の小さい極限で線形理論の結果に漸近

- 先行研究の結果を再現

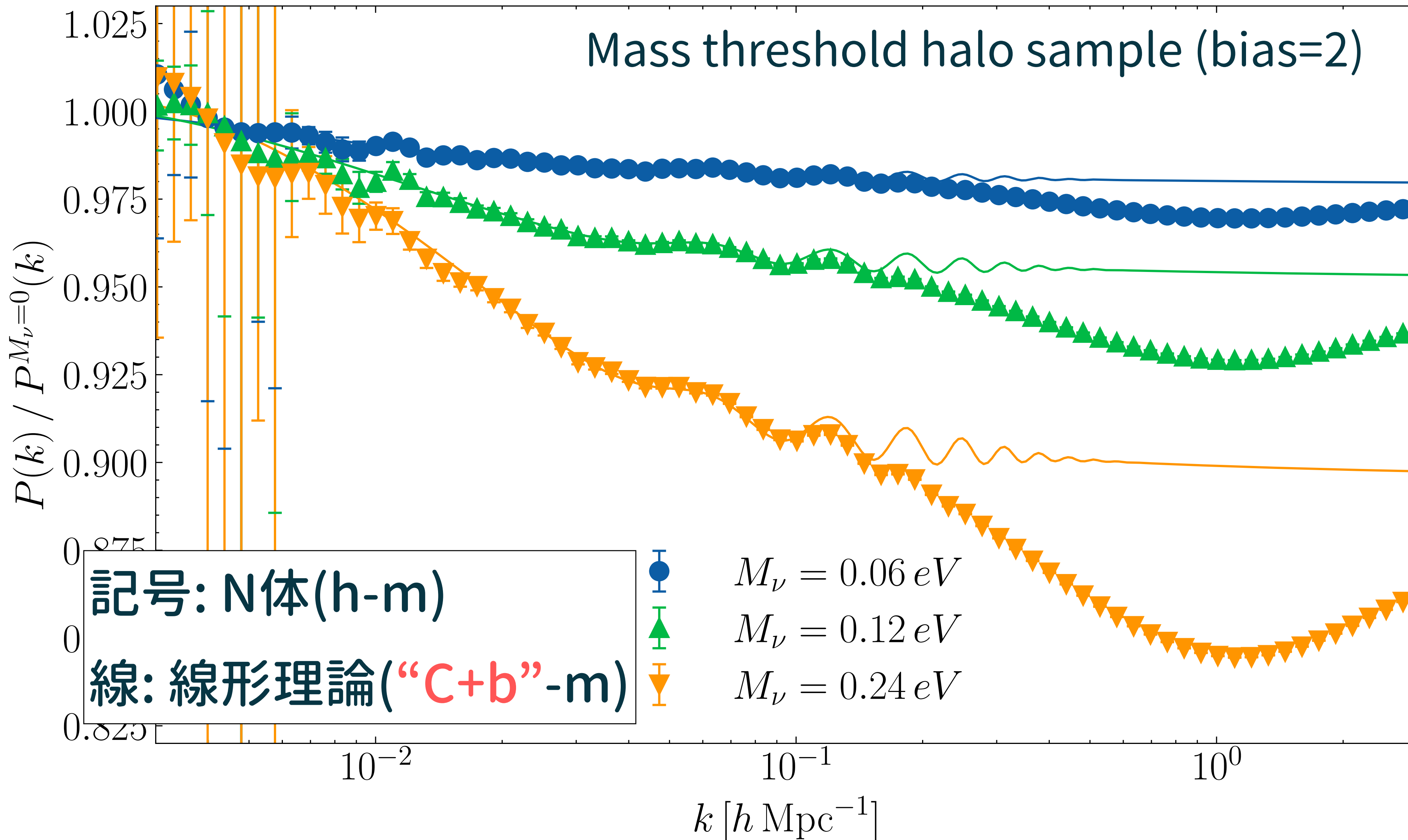
※エラーバーは見え
ないくらい小さい

Halo-Matter cross spectrum



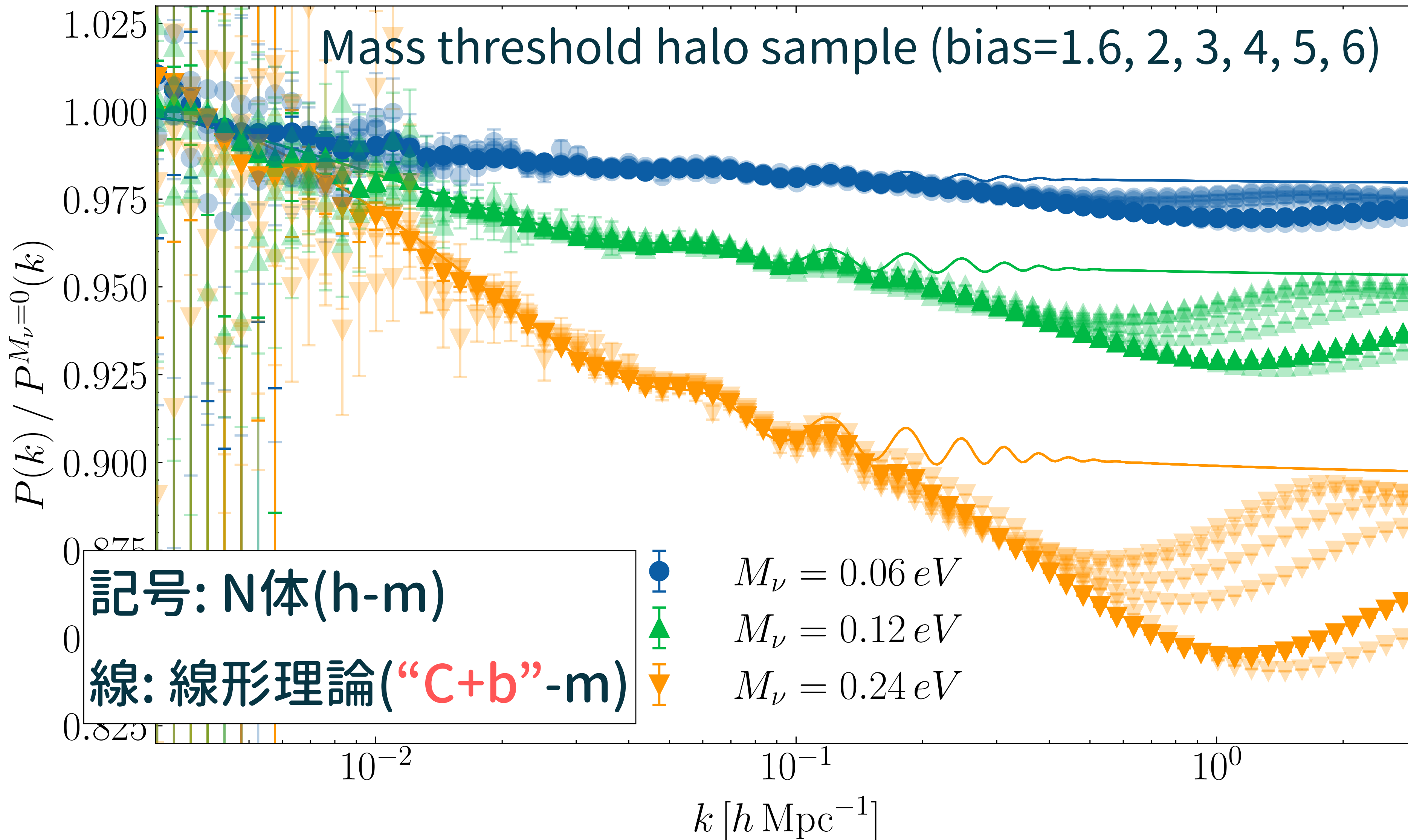
- haloはmatterとは異なるニュートリノ質量依存性？

Halo-Matter cross spectrum



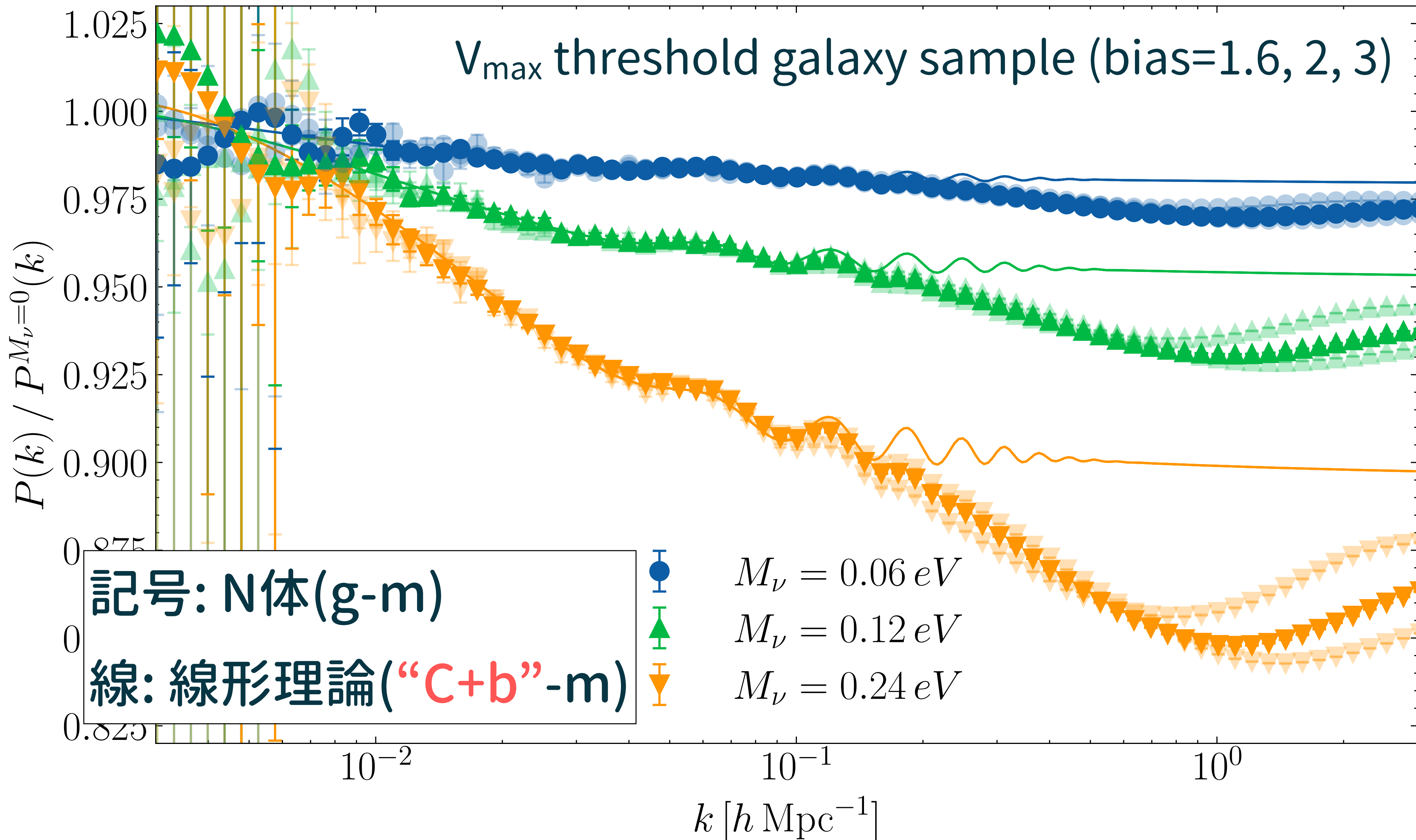
- Haloは全質量よりむしろCDM + baryonの分布をよくトレース

Halo-Matter cross spectrum



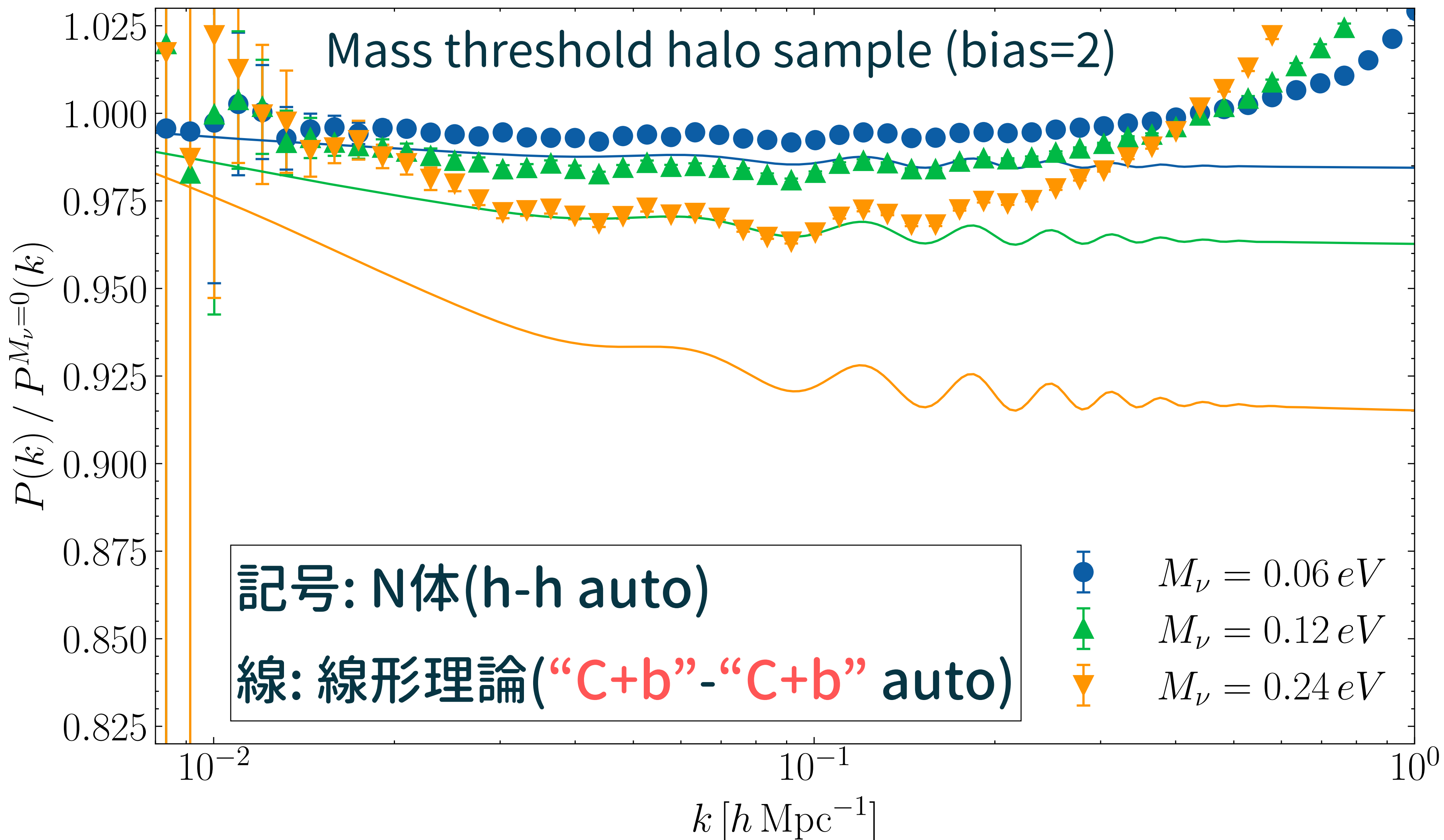
- 様々な質量のHalo
で見ても結果は同
様
- $k \sim 0.08 h/\text{Mpc}$ 程度
までは線形理論を
再現

Galaxy-Matter cross spectrum



- 銀河でも同様に、
CDM + baryonをト
レース

Halo-Halo auto spectrum



- ところが、ハローの自己相関を見ると、これまで見たものと全く異なる

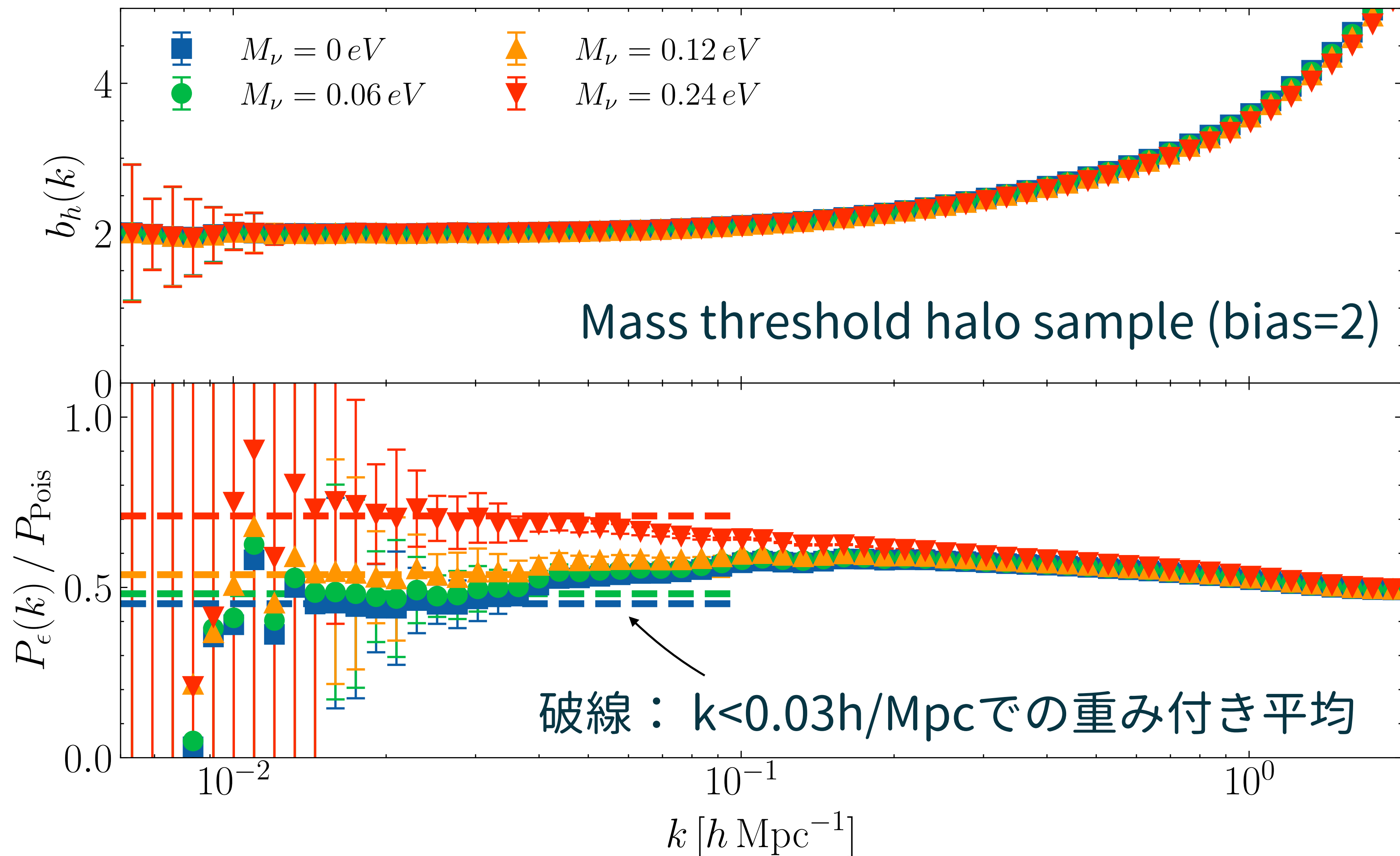
$$\delta_k^h = b(k)\delta_k^{cb} + \epsilon_k$$

$$\langle \delta_k^{cb} \epsilon_{k'} \rangle = 0$$

と書いた時の、
stochastic term (ϵ)
が効いている？

(Seljak, Hamaus, Desjacques '09)

Bias and Noise term



- ところが、ハローの自己相関を見ると、これまで見たものと全く異なる

$$\delta_k^h = b(k)\delta_k^{cb} + \epsilon_k$$

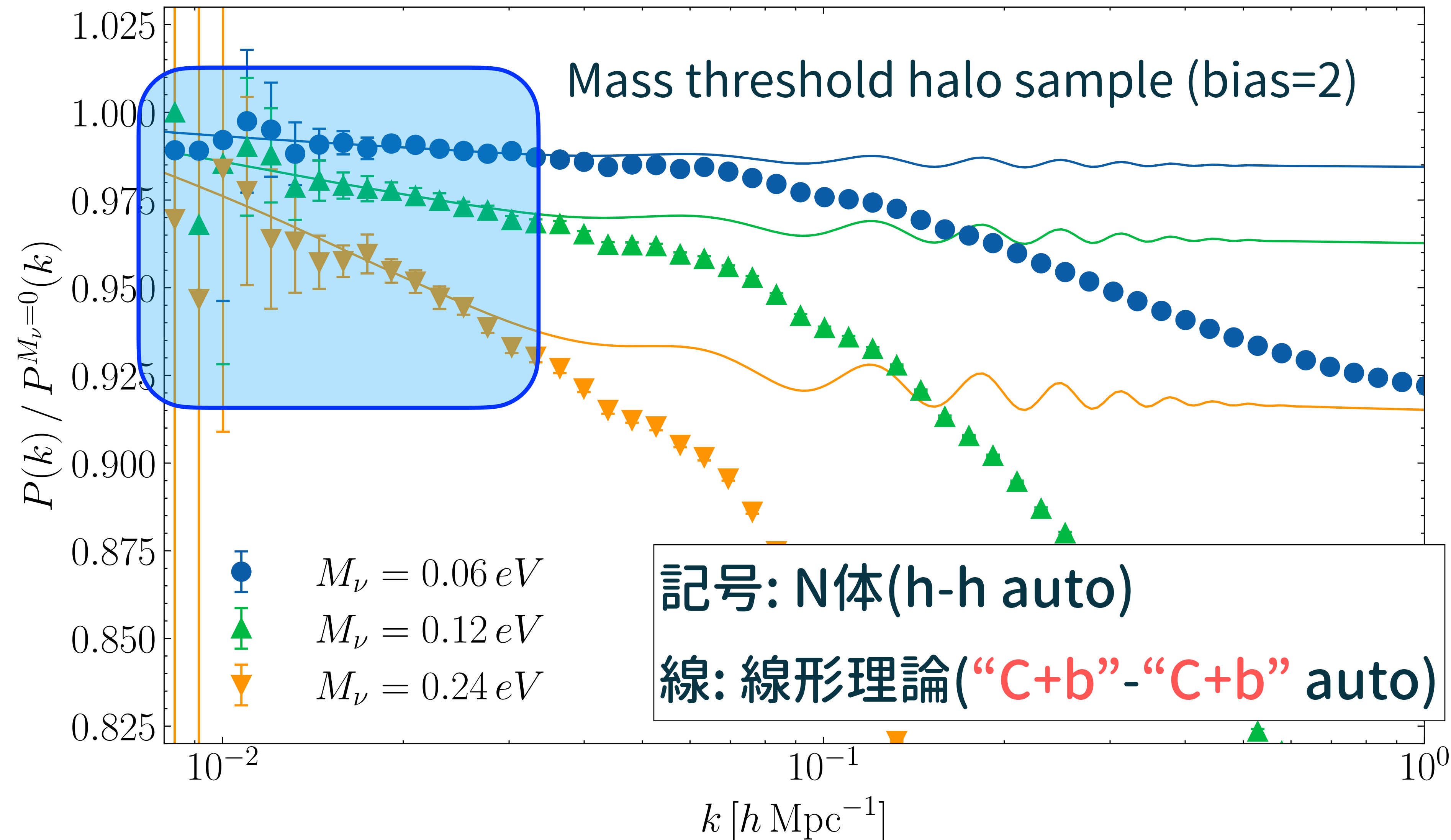
$$\langle \delta_k^{cb} \epsilon_{k'} \rangle = 0$$

と書いた時の、
stochastic term (ϵ)
が効いている？

(Seljak, Hamaus, Desjacques '09)

→ Yes!

Halo-Halo auto spectrum



Residual shot noise subtraction

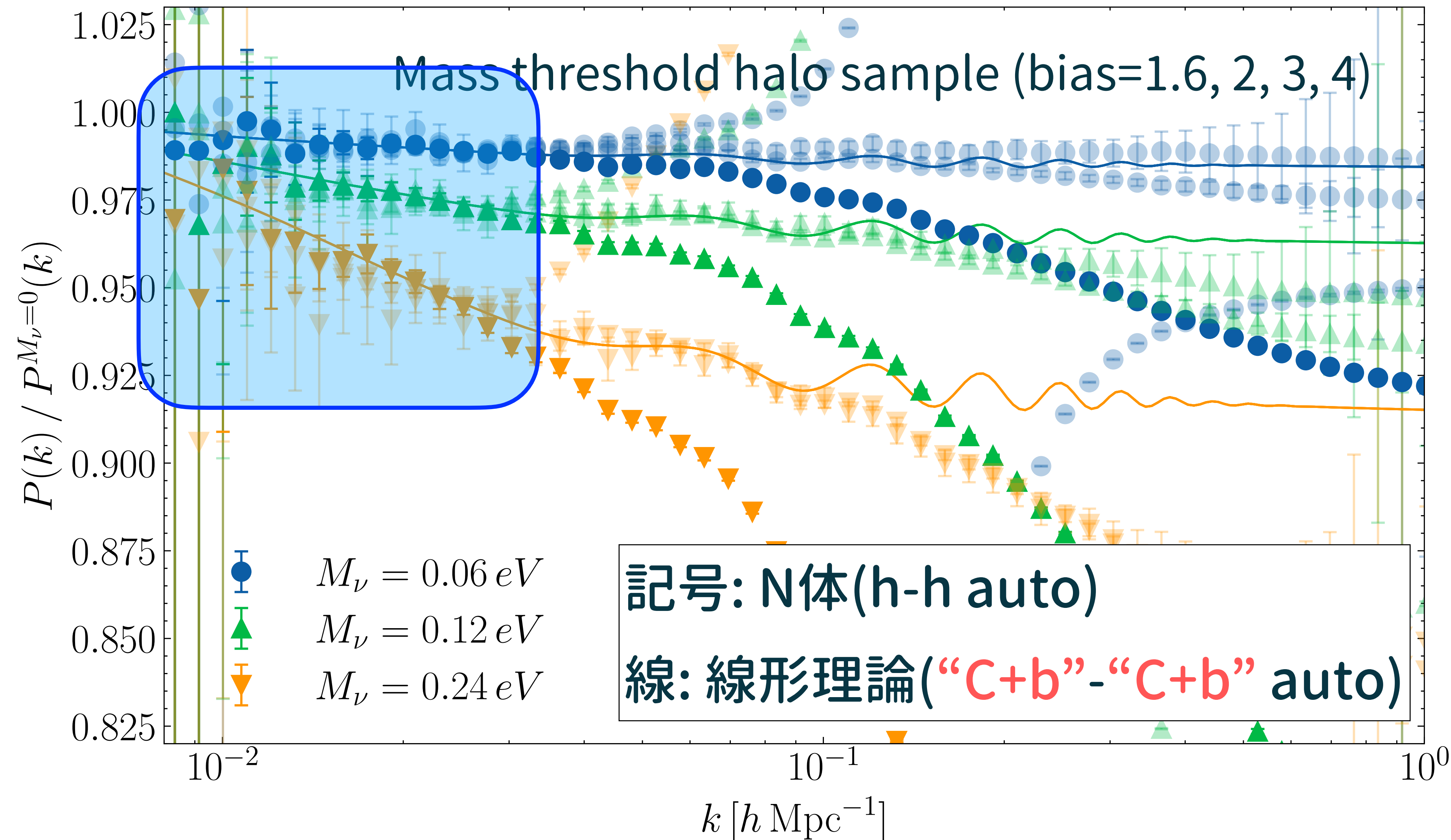
$$\delta_k^h = b(k)\delta_k^{cb} + \epsilon_k$$

$$\langle \delta_k^{cb} \epsilon_{k'} \rangle = 0$$

$$P_\epsilon = \langle |\epsilon_{\mathbf{k}}|^2 \rangle = \text{const.}$$

k<0.03h/Mpcで測った
constant noise term
を測定値から引く

Halo-Halo auto spectrum



Residual shot noise subtraction

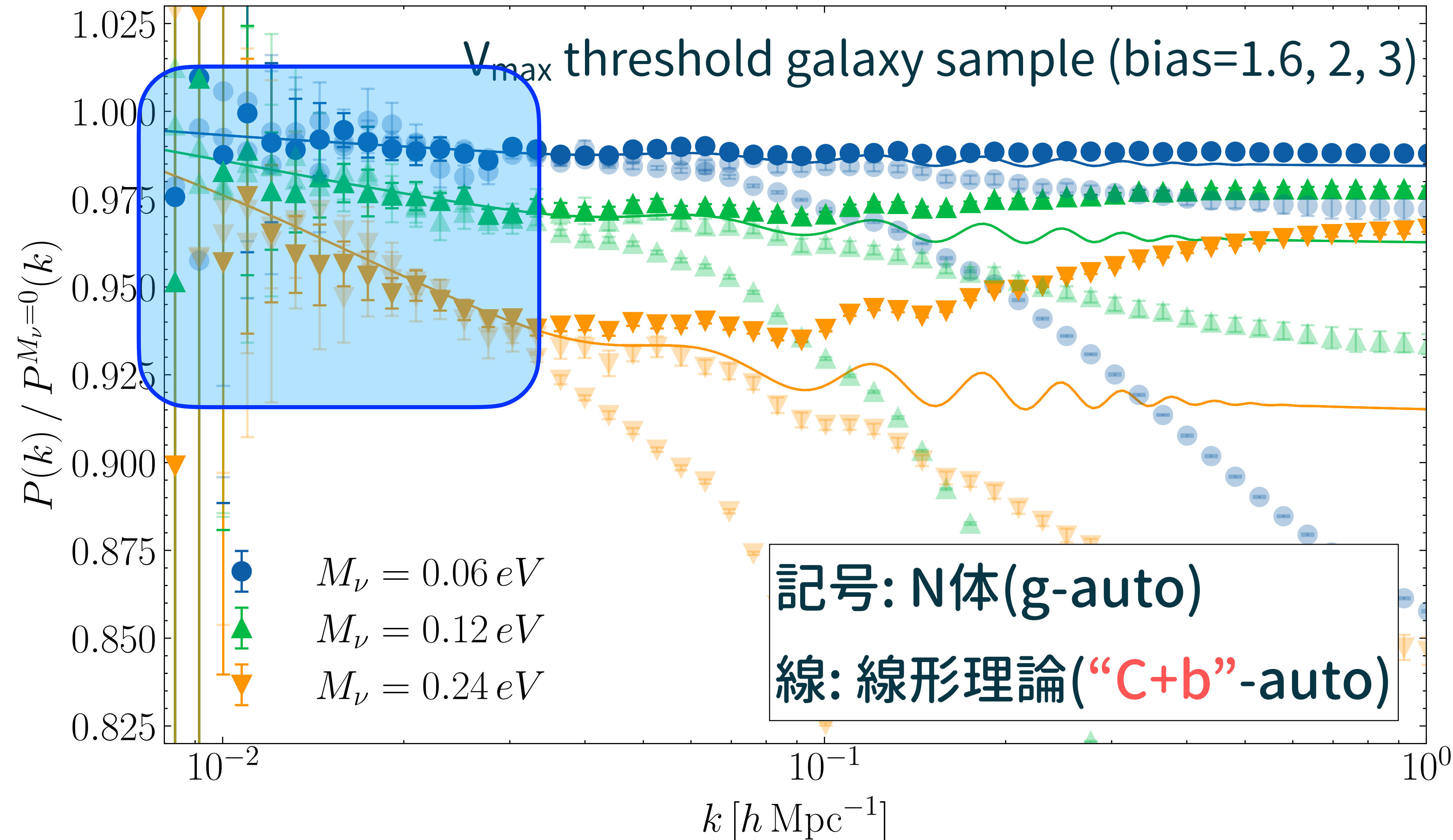
$$\delta_k^h = b(k)\delta_k^{cb} + \epsilon_k$$

$$\langle \delta_k^{cb} \epsilon_{k'} \rangle = 0$$

$$P_\epsilon = \langle |\epsilon_{\mathbf{k}}|^2 \rangle = \text{const.}$$

k<0.03h/Mpcで測った
constant noise term
を測定値から引く

Galaxy-galaxy auto spectrum



Residual shot noise subtraction

$$\delta_k^h = b(k)\delta_k^{cb} + \epsilon_k$$

$$\langle \delta_k^{cb} \epsilon_{k'} \rangle = 0$$

$$P_\epsilon = \langle |\epsilon_{\mathbf{k}}|^2 \rangle = \text{const.}$$

k<0.03h/Mpcで測った
constant noise term
を測定値から引く

まとめ

- 高速シミュレーションコードを活かして $(4\text{Gpc}/h)^3$ もの領域にわたり $10^{13}M_{\text{太陽}}$ 程度までの（サブ）ハローを同定（ $z=0$ で1 box 2千万個程度）
- 有質量ニュートリノありの場合のhalo/galaxyの揺らぎは、**total matter**ではなく**CDM+baryon**を良くトレース
- matterとのcross powerで見ると、 $k \sim 0.08h/\text{Mpc}$ 程度まではほぼ完璧
- Biased tracer同士の自己相関で見ると、**residual noise term**の影響が
 - フィットの際に定数項を入れておけば大丈夫そう
 - だが、有効範囲はやや狭い($k \sim 0.03h/\text{Mpc}$ まで)
 - 距離依存のnoise modelが必要？